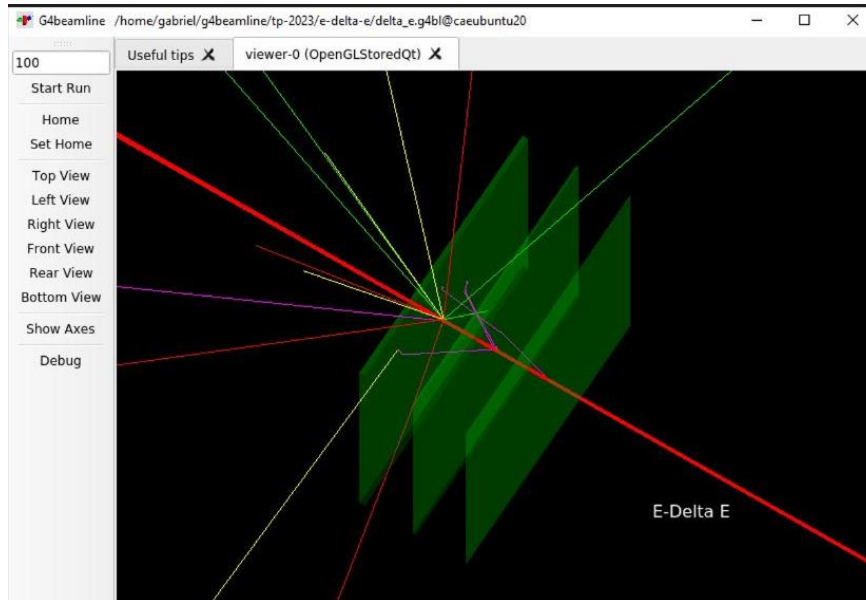


## Guide des simulations Monte Carlo à réaliser sous G4 BeamLine (Responsable JC Angélique)



**Interaction d'un faisceau d'ions dans un télescope constitués de trois détecteurs au silicium**

**Important :** un programme **csi-cube.g4bl** et **csi-cube.root** de références et un de nombreux documents sont disponibles dans le dossier TPG4bl accessible sur le serveur des salles de TP du bâtiment E de l'Ensi : Dossier personnel /Public/Angelique/TP-G4BL.

**Remarque:** Il sera judicieux d'ouvrir une fenêtre (terminal) différente pour chacune des applications : g4bl, root, python3, uproot... ;

- **Pour l'utilisation de Géant4, root et G4beamline.** Au démarrage et à l'ouverture de toute nouvelle fenêtre ne pas oublier de lancer, successivement, à partir du dossier de travail où sont les fichiers .g4bl les commandes ci-dessous pour s'attacher les fichiers sources Géant4 et G4beamline :
  - `source /opt/cern/geant/geant4.10.05.p01/bin/geant4.sh`
  - `source /opt/G4beamline/G4beamline-3.08/bin/g4bl-setup.sh`
  - Il n'est, normalement, plus indispensable de "sourcer" root. Il fonctionne dans console en tapant simplement root.
  - Avant de lancer g4blgui, pour éviter de toujours avoir à télécharger à chaque fois les "DATAS" vous pouvez passer la commande : `ln -s -f /opt/G4beamline/Geant4Data ~/`
- **Pour l'utilisation de uproot permettant l'ouverture des fichiers root sous python.**
- Au démarrage et à l'ouverture de toute nouvelle fenêtre ne pas oublier de lancer la commande :
  - `source /opt/python-app/uproot/bin/activate`

**Simulation 1 :** Prise en main logiciels G4bl et Root avec exemple étude Cube-CsI.

**Simulation 2 :** Spectroscopie gamma avec un scintillateur NaI.

**Simulation 3 :** Etude d'atténuation des photons par la matière.

**Simulation 4 :** Etude de l'efficacité d'un détecteur de photons. Vérification loi en  $1/d^2$

**Simulation 5 :** Dépôt d'énergie des photons et particules chargées dans l'eau.

**Simulation 6 :** Méthode d'identification de particules chargées  $E \Delta E$ . localisation du point de rebroussement.

**Simulation 7 :** Etude de la fluorescence X.

**Simulation 8 :** Mise en évidence du phénomène d'accumulation dit aussi de build-up.

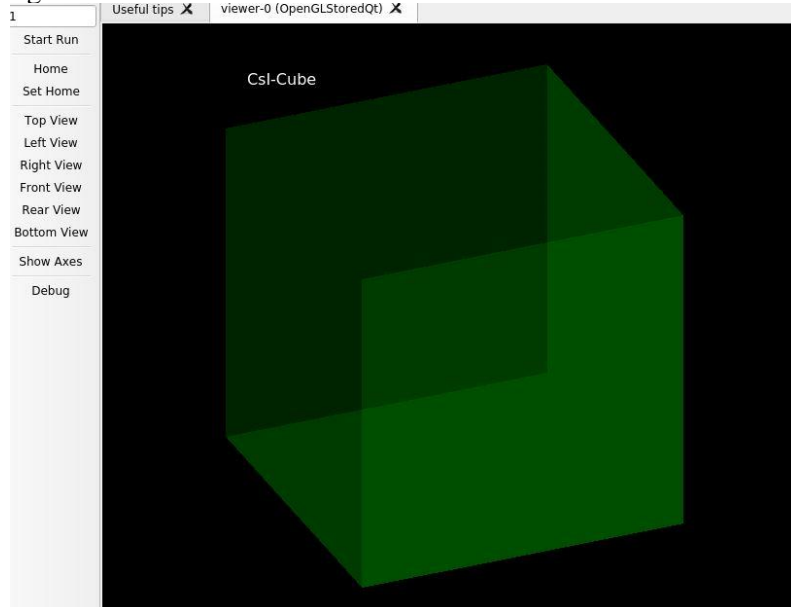
**Simulation ++ :** Si le temps le permet un perfectionnement sera proposé permettant d'améliorer les simulations et les connaissances dans l'analyse des données par root.

## Simulation 1 : Prise en main logiciel. Etude d'un Cube-CsI

A partir du programme de référence construire un détecteur correspondant à un cube de Iodure de Césium (CsI). On prendra bien soin de renommer le nouveau programme et de toujours garder **csi-cube.g4bl** et **csi-cube.root** d'origine. Cela va nous permettre de savoir que le problème ne vient pas du logiciel mais du programme.

Les caractéristiques du scintillateur sont les suivantes :

Masse volumique :  $4,51\text{g/cm}^3$ . Coté du cube  $a=50\text{mm}$



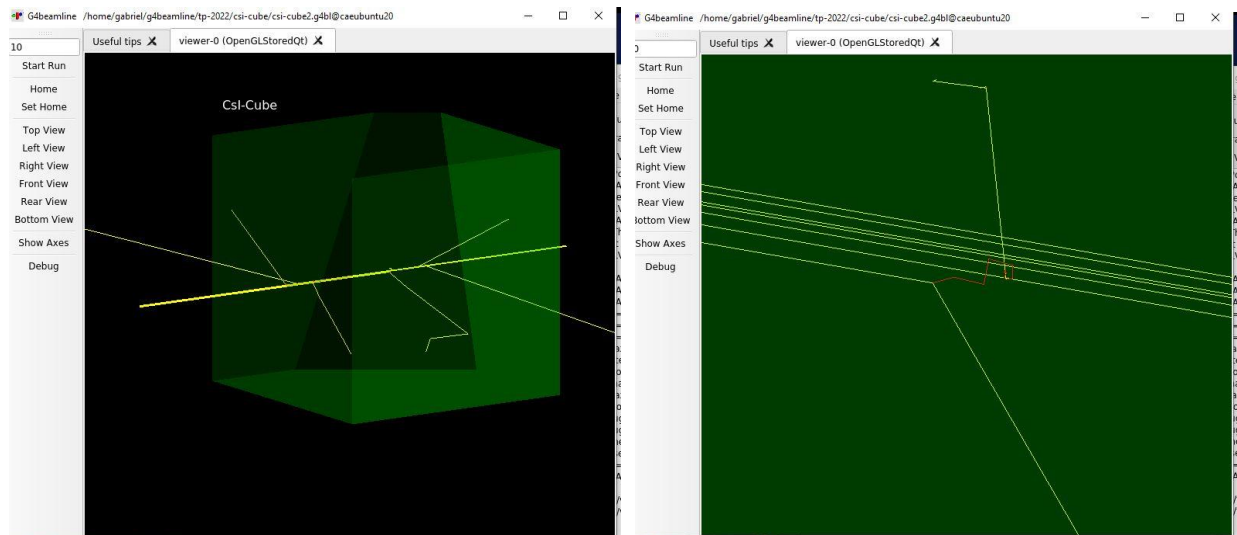
Aspect du Cube de CsI en transparence sur G4blgui

On générera initialement des photons de 500 keV dirigés vers ce cube.

En utilisant l'interface graphique g4blgui

Visualiser les interactions des photons de différentes énergies dans le scintillateur

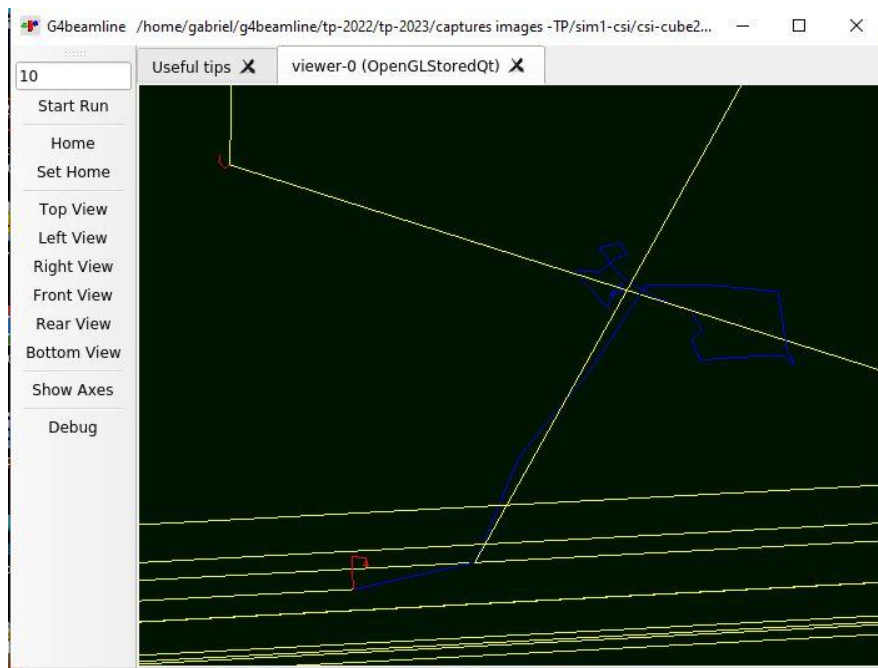
Qu'observez-vous avec des photons incidents directionnels de 500 keV ?



Visualisation d'interaction de photons dans le CsI (jaune) Zoom avec visualisation d'électrons (rouge)

Quel changement constatez-vous si vous prenez des photons de 3MeV ?

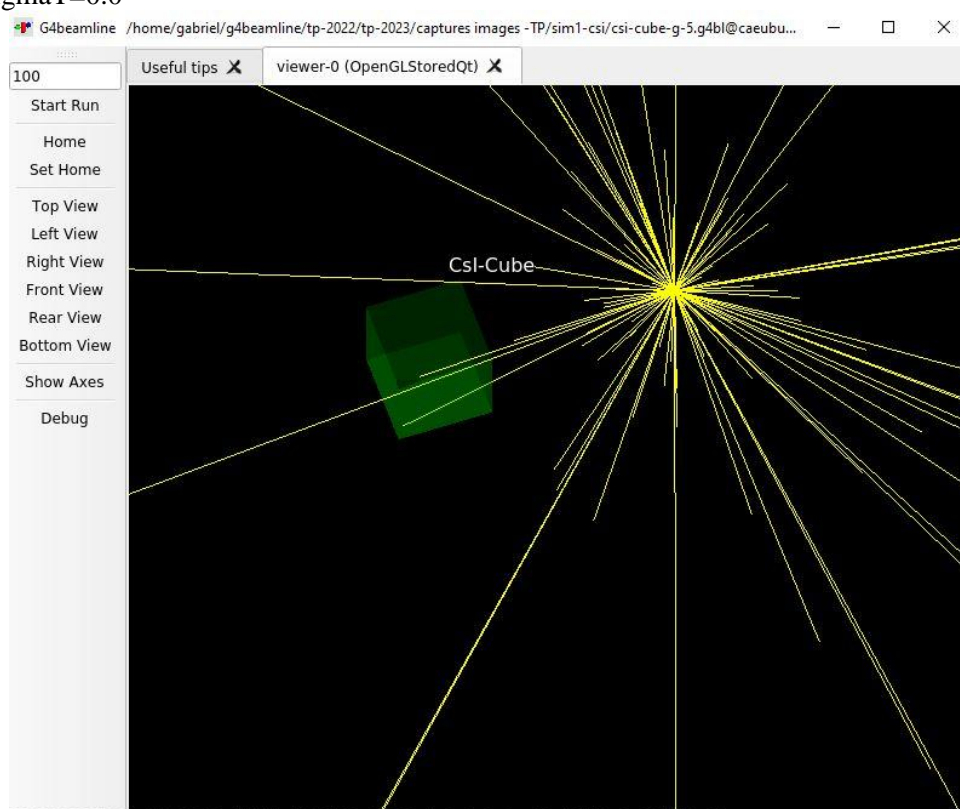
Identifier les particules créées (électrons, positrons).



**Zoom avec création d'un  $e^+$  (bleu) et annihilation (2 photons).**

Faire une simulation en utilisant une source isotrope.

Commande : `isotropicsource particle=gamma nEvents=100000 x=0.0 y=0.0 z=0.0 meanP=3 sigmaP=0.0 meanT=0.0 sigmaT=0.0`



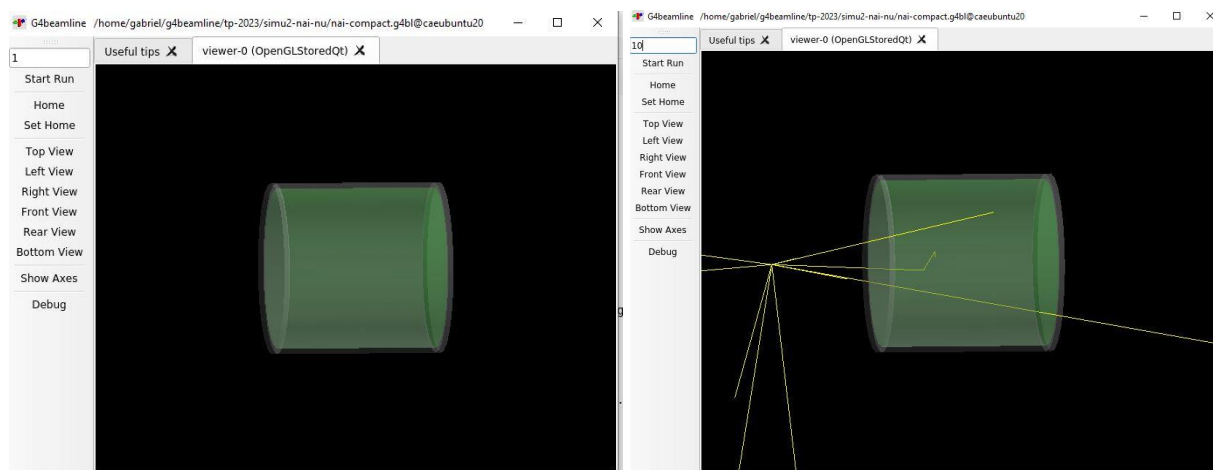
**Cube CsI avec une source de photons isotrope**

Maintenant on va tenter de reproduire à travers les 2 simulations suivantes les réponses obtenues au cours des travaux pratiques effectués au premier semestre concernant la spectrométrie gamma et l'atténuation d'un faisceau gamma par des écrans de matières.

Reprenez vos résultats de compte rendu afin de les comparer aux résultats qui seront obtenus par les simulations. La source de photons utilisée sera une source de Cs137 émettant des photons de 662keV.

## Simulation 2 : Spectroscopie gamma

Créer un détecteur cylindrique de photons du type scintillateur NaI dont les caractéristiques sont les suivantes :  
Masse volumique:  $3,67\text{g/cm}^3$ . Rayon du cylindre : 30mm Hauteur du cylindre: 60mm  
Pour être plus réaliste reproduira la coque de protection du scintillateur par une épaisseur de 2mm d'aluminium tout autour du détecteur. On conservera une version du détecteur sans protection et avec protection.



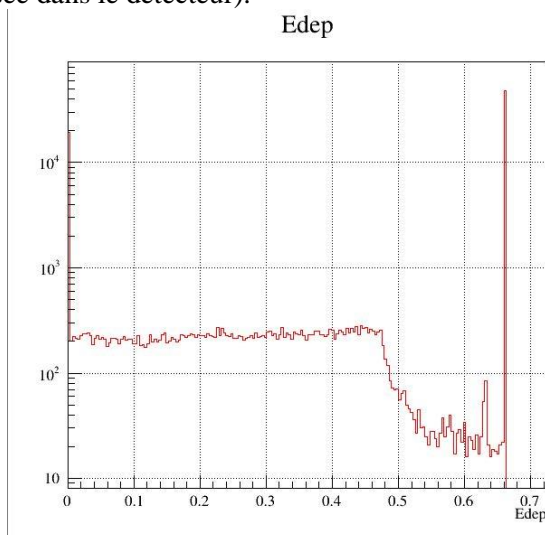
**Cylindre NaI avec sa protection en aluminium.**

Pour commencer, simuler une source de 10000 photons de 662 keV monodirectionnel dans ce détecteur. Dans le programme nommé par exemple toto. Vérifier que votre programme est correctement écrit en utilisant l'interface graphique g4blgui

Lorsque le programme toto fonctionne apparemment correctement accumuler la statistique en lançant la simulation par la commande g4bl toto.g4bl

Le fichier de sortie s'appellera toujours g4beamline.root. On pourra le renommer en conservant l'extension .root.

Visualiser le spectre correspondant le dépôt d'énergie dans le détecteur à l'aide du logiciel root  
Variable Edep (Energie déposée dans le détecteur).



**Spectre Edep obtenu à partir d'une source de photons de 662keV dans NaI**

Identifier les différentes contributions au spectre.

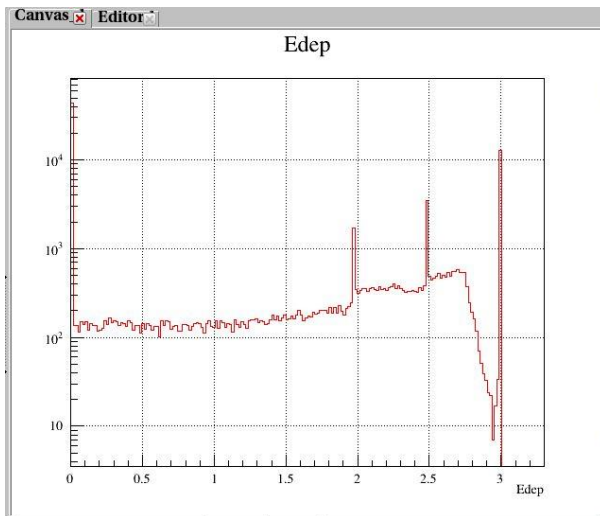
Différents pics sont présents vers 630 keV et 660 keV.

Comparer au spectre obtenu lors des travaux pratiques. Expliquer les différences.

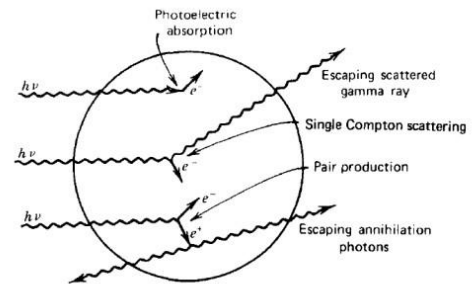
Calculer et retrouver sur le graphique l'énergie du front Compton. On pourra notamment créer à cette occasion un fichier excel permettant de calculer les énergies de l'électron et du photon diffusé en fonction de l'angle de diffusion.

N'hésitez pas à changer vos conditions de simulations pour vérifier vos hypothèses.

Simuler des photons de 3 MeV monodirectionnel dans ce détecteur.  
 Visualiser le dépôt d'énergie dans le détecteur à l'aide du logiciel root.  
 Identifier les différentes contributions au spectre. On identifiera notamment les pics de simple et double échappement.



**Spectre Edep obtenu à partir d'une source de photons de 3MeV dans NaI.**



**Processus d'échappement dans un détecteur**

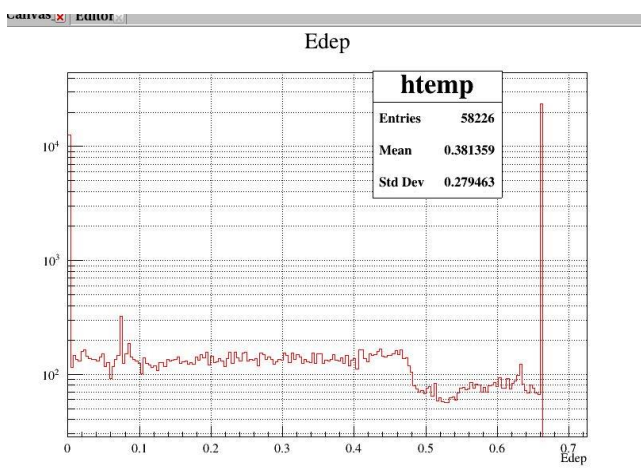
### **Simulation 3 : Etude d'atténuation des photons par la matière avec détecteur NaI**

On voudrait étudier la loi d'atténuation des matériaux vis-à-vis des photons comme celle étudiée en cours d'IRM et mise en évidence expérimentalement en travaux pratiques au cours de 1<sup>er</sup> semestre avec une source de photons de Césium 137.

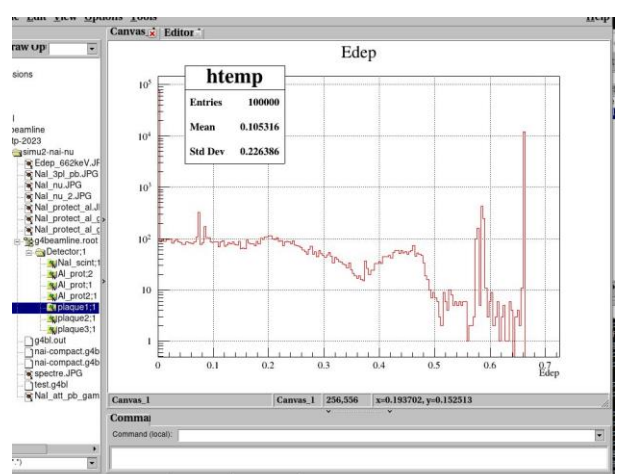
Partir du programme précédent en le changeant de nom par exple toto\_att

Reproduire en simulation le TP. Interposés progressivement différents écrans de même épaisseur d'un matériel comme le plomb, le cuivre ou l'aluminium et procédez comme durant les séances de travaux pratiques c'est-à-dire mesurer le nombre de photons transmis à chaque simulation.

Tracer pour chacun des matériau l'évolution du logarithme de nombre en fonction de l'épaisseur de matière traversée et retrouver le coefficient  $\mu$  de ce matériau. Comparer à la valeur obtenue en travaux pratiques et à la valeur connues des tables d'atténuation (cf . <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>)



**Spectre Edep obtenu dans NaI**



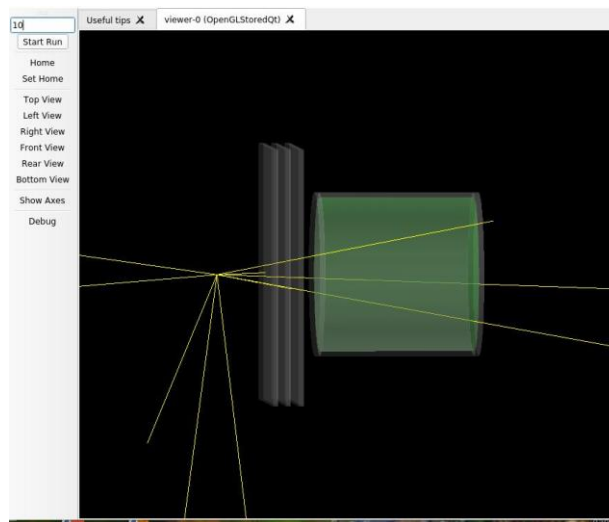
**Spectre Edep observé dans une plaque de plomb**

### **Pour aller plus loin :**

Quels sont les changements observés si on utilise une source isotrope.

Effectuer une simulation unique en cumulant tous les écrans de plomb ou de cuivre ou d'aluminium.





**Vue du dispositif : scintillateur NaI avec trois écrans de plomb**

Essayer d'extraire de vos mesures les contributions Compton et photoélectrique de ce coefficient d'atténuation linéaire.

#### **Simulation 4 : Etude de l'efficacité photoélectrique d'un détecteur de photons**

On aimerait déterminer les efficacités de détection du scintillateur NaI

Rappeler ce qu'est l'efficacité totale de détection, l'efficacité intrinsèque (en énergie) et l'efficacité géométrique

On placera la source, dans l'axe du détecteur et à une distance de 10cm de la surface d'entrée du détecteur.

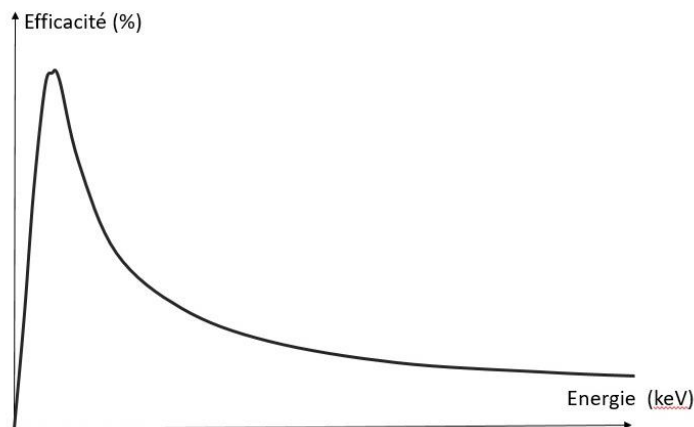
On choisira une source isotrope.

**Calculer l'efficacité totale de détection** pour les énergies de photons suivantes :

30 keV, 50 keV, 100keV, 150 keV, 200 keV, 400keV, 662 keV, 1MeV, 2MeV

Tracer la courbe d'efficacité totale en fonction de l'énergie.

Rmq : Pour affiner la courbe d'autres énergies pourront être choisies.



**Allure typique d'une courbe d'efficacité**

On aimerait connaître la contribution de l'efficacité intrinsèque et géométrique à l'efficacité totale pour des photons de 662keV.

Déterminer par la simulation **l'efficacité géométrique** de votre dispositif

Calculer par un calcul d'angle solide simple l'efficacité géométrique de votre dispositif et comparer au résultat précédent.

**Vérification de la loi en  $1/d^2$**  : Vérifier que le nombre de photons reçus par le détecteur varie bien comme l'inverse du carré de la distance entre la source et détecteur.

En déduire **l'efficacité intrinsèque** du détecteur pour des photons de 662keV.

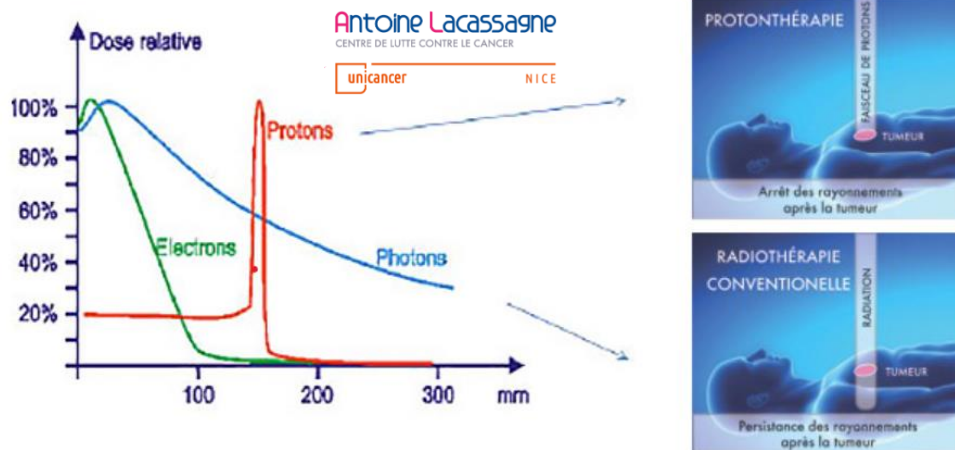
Vérifier par la simulation la valeur approchée de cette efficacité en utilisant une source monodirectionnelle.

## Simulation 5 : Dépôt d'énergie des photons et particules chargées dans l'eau

**Mise en évidence de la dispersion (« Straggling ») en énergie et de la dispersion angulaire.**

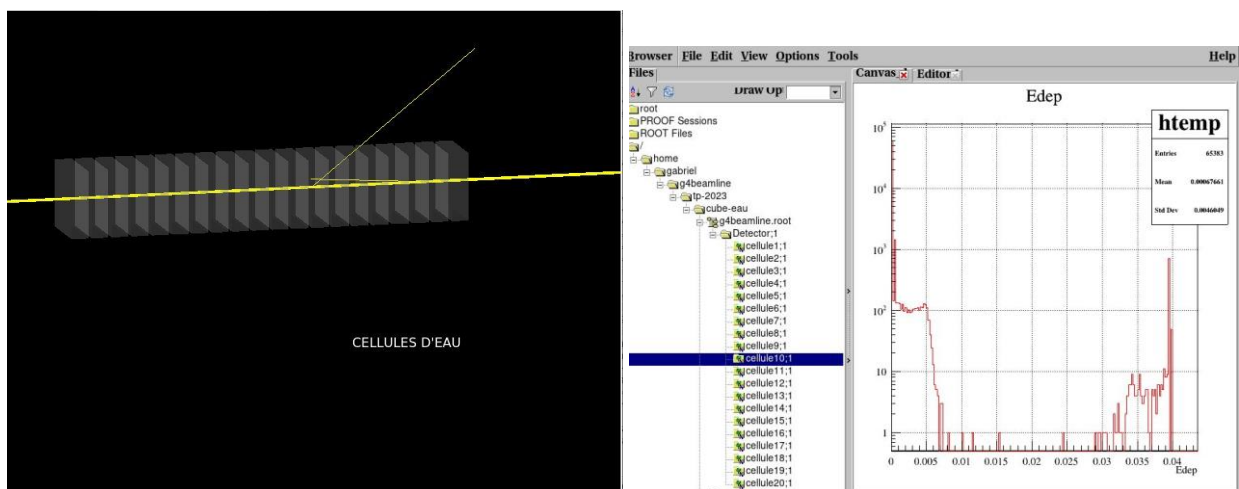
### **Construction du Pic de Bragg.**

On voudrait illustrer les particularités de dépôt d'énergie dans la matière qui est différent suivant le type de particule considérée (particule neutres, particules chargées). Comme on peut le constater sur la figure ci-dessous provenant du centre d'oncologie de Nice, le dépôt d'énergie est différent suivant qu'il s'agisse d'un photon d'un électron ou d'un proton. Les protons ont la particularité par rapport aux photons et électrons de délivrer leur dose plus localement (au niveau de la tumeur) en irradiant plus faiblement au-delà de la tumeur ce qui permet de diminuer les toxicités par rapport aux particules utilisées en routine :



Dépôt d'énergie (dose relative) en fonction de la profondeur pour photons, électrons ou protons.

Construire une succession de 20 cellules d'eau toutes identiques d'épaisseur de 2mm une et de 1cm de côté juxtaposées les unes à côté des autres. L'ensemble formera un parallélépipède rectangle d'eau de 4cm d'épaisseur et de 1cm de côté



**Vue du dispositif des cellules d'eau avec un faisceau de photons. Spectre Edep observé dans une cellule d'eau.**

Mesurer et tracer l'évolution du dépôt d'énergie engendré par un faisceau monodirectionnel de photons de 1 MeV en fonction de la profondeur de matière (c'est à dire en fonction du nombre de cellules atteintes).

On va modifier la nature des particules incidentes. On n'oubliera pas d'observer les interactions sur l'interface graphique G4blgui.

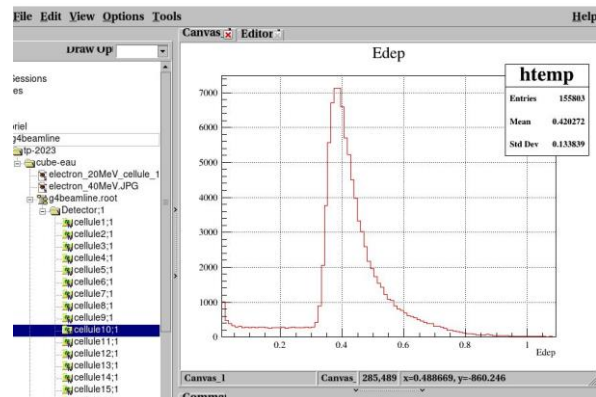
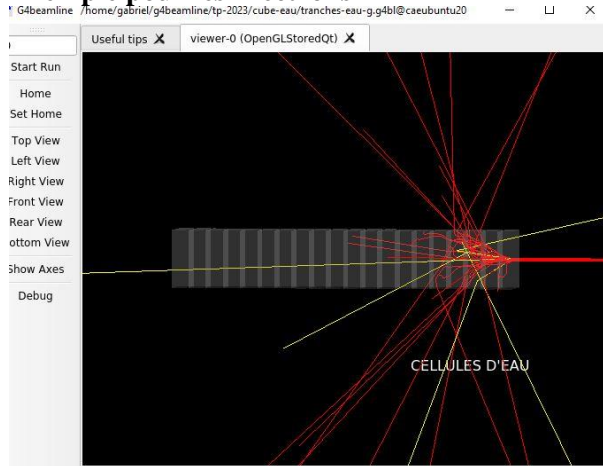
Mesurer et tracer l'évolution du dépôt d'énergie engendré par un faisceau monodirectionnel d'électrons de 20 MeV en fonction de la profondeur de matière.

Mesurer et tracer l'évolution du dépôt d'énergie moyen engendré par un faisceau monodirectionnel de protons de 50 MeV en fonction de la profondeur de matière.

Mesurer et tracer l'évolution du dépôt d'énergie engendré par un faisceau monodirectionnel de particules alphas de 150 MeV en fonction de la profondeur de matière. Observez au cours des simulations les phénomènes de dispersion angulaire et en énergie du faisceau incident. Retrouvez l'allure du pic de Bragg vu en cours et tracé expérimentalement en travaux pratiques ?

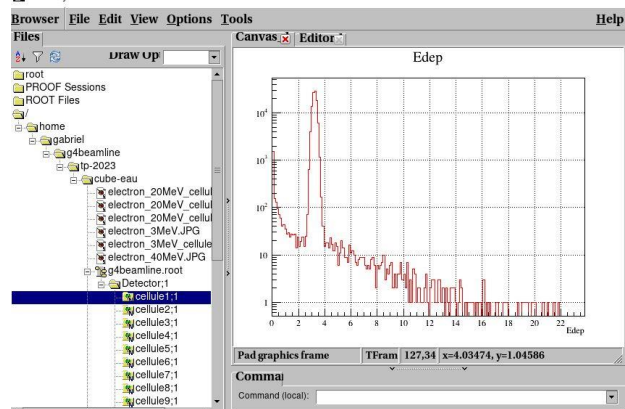
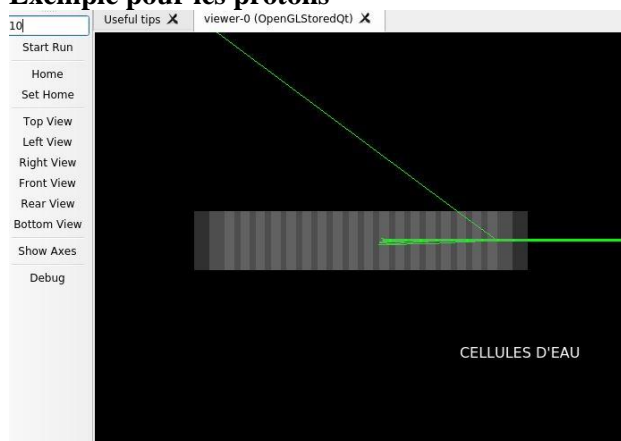
N'hésitez pas à modifier l'épaisseur des cellules d'eau pour affiner les courbes. En supposant que la cellule 15 soit une cellule maligne à traiter, quelle énergie du faisceau de proto ou quelle énergie d'un faisceau de particules alphas utiliserez-vous pour traiter ?

### Exemple pour les Electrons



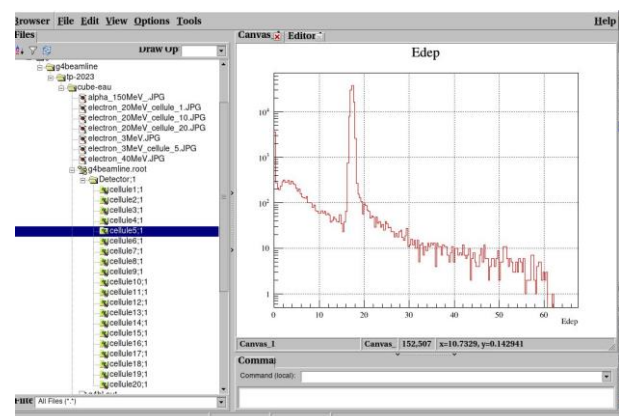
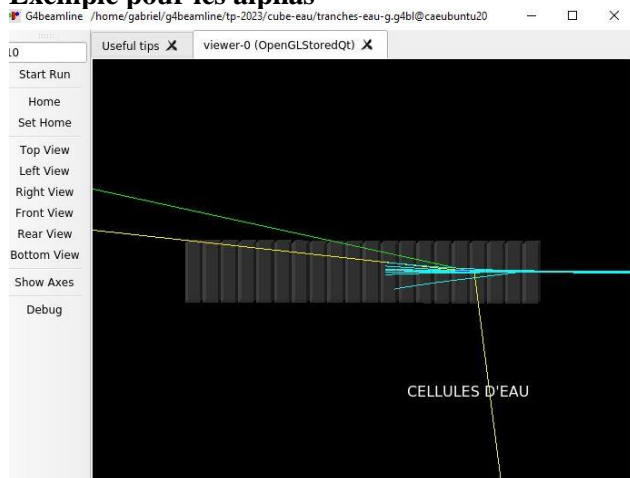
Vue du dispositif des cellules d'eau avec un faisceau d'électrons. Spectre Edep observé dans une cellule d'eau.

### Exemple pour les protons



Vue du dispositif des cellules d'eau avec un faisceau de protons. Spectre Edep observé dans une cellule d'eau.

### Exemple pour les alphas



Vue du dispositif des cellules d'eau avec un faisceau d'alphas. Spectre Edep observé dans une cellule d'eau.

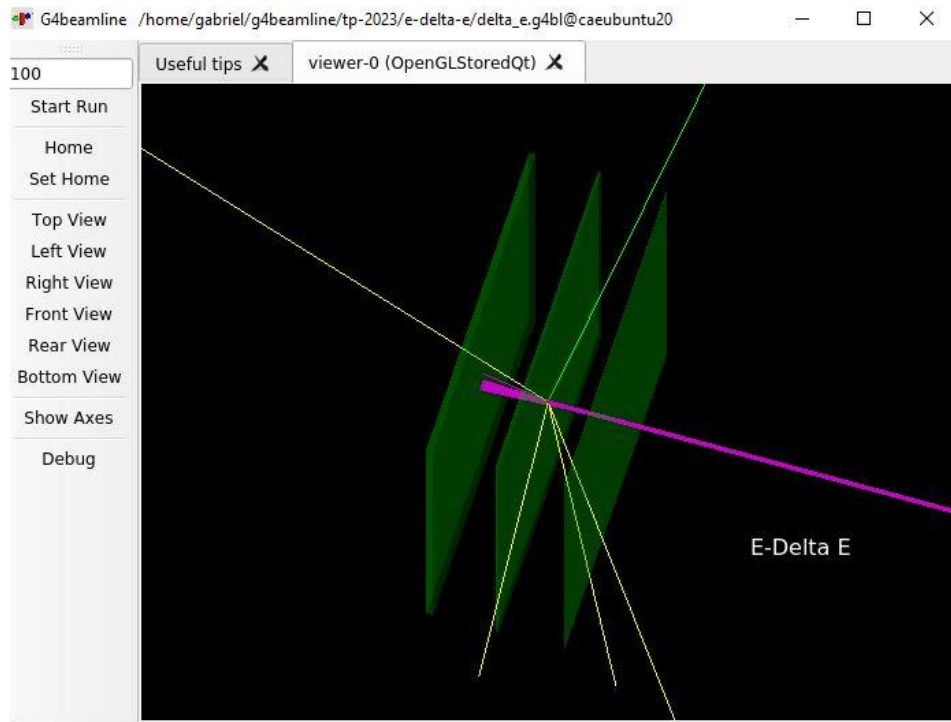
Si le temps le permet, on pourra faire la même simulation avec un faisceau de neutron de 5 MeV.



## Simulation 6 : Méthode d'identification de particules chargées E $\Delta E$ . Mise en évidence du point de rebroussement.

Vous avez vu en cours d'IRM à travers la formule de Bethe-Bloch que la perte d'énergie d'une particule chargée est proportionnelle au numéro atomique du matériau traversé au carré de la charge de la particule incidente et inversement proportionnelle à la vitesse de la particule incidente.

On va se servir de ces propriétés pour identifier le type de particule (numéro atomique) ayant interagi dans le dispositif.



Vue d'ensemble du dispositif constitué de trois détecteurs silicium.

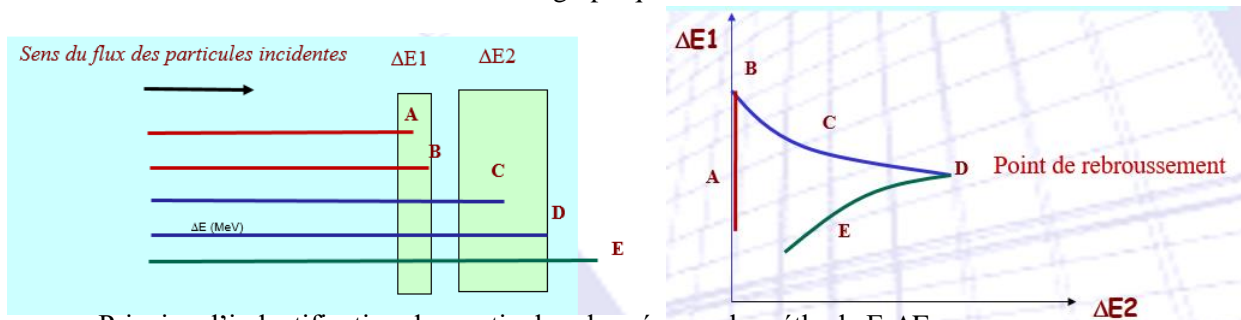
Construire trois détecteurs silicium placés successivement les uns derrière les autres d'épaisseurs différentes de 100  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  et 1mm. (Silicium symbole Si :  $Z=14$ ,  $A=28$ , masse volumique=2,33g/cm<sup>3</sup>) Générer un faisceau monodirectionnel de protons et faire varier successivement l'énergie de ces protons pour traverser progressivement les 3 détecteurs dans l'ordre croissant des épaisseurs. Le détecteur de plus faible épaisseur étant atteint en premier.

Relever l'énergie déposée dans les trois détecteurs. Tracer l'énergie déposée dans second détecteur en fonction de l'énergie déposée dans le second

Nous devons voir apparaître une hyperbole. A partir de l'instant où la particule traverse le second détecteur nous avons dépassé le point de rebroussement. Identifier ce point.

Dans le domaine du possible et en fonction du temps faire les mêmes simulations avec un faisceau de deutons (énergie < 25 MeV), tritons (énergie < 30 MeV), hélium 3 (énergie < 40 MeV), alphas (énergie < 50 MeV).

Tracer l'ensemble de ces courbes sur le même graphique.



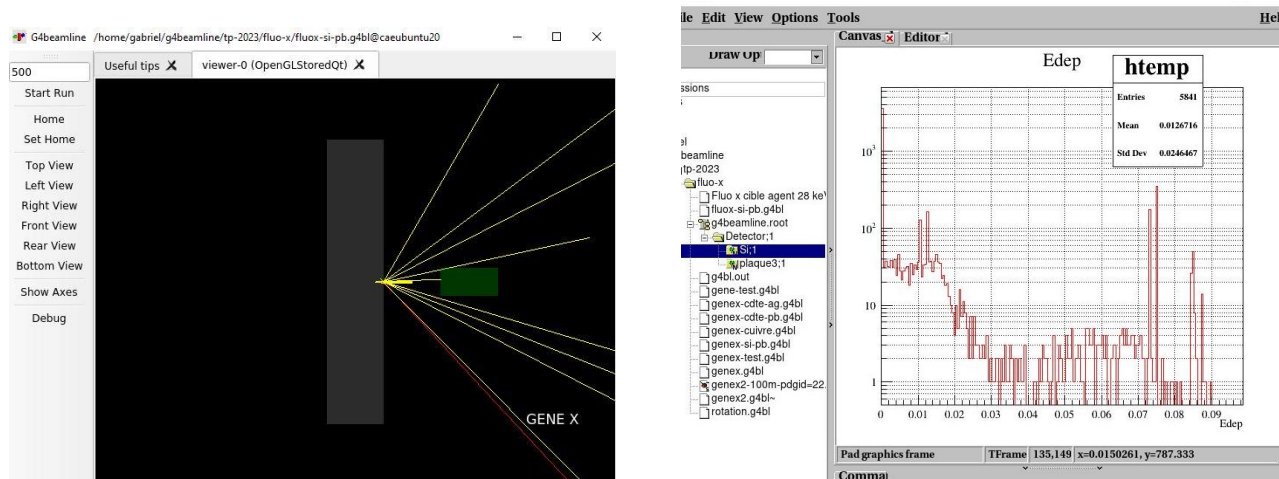
Principe d'identification des particules chargées par la méthode E- $\Delta E$ .

### Simulation 7 : Etude de la fluorescence X.

On voudrait à travers cette simulation reproduire le phénomène de fluorescence X permettant l'identification de différents matériaux.

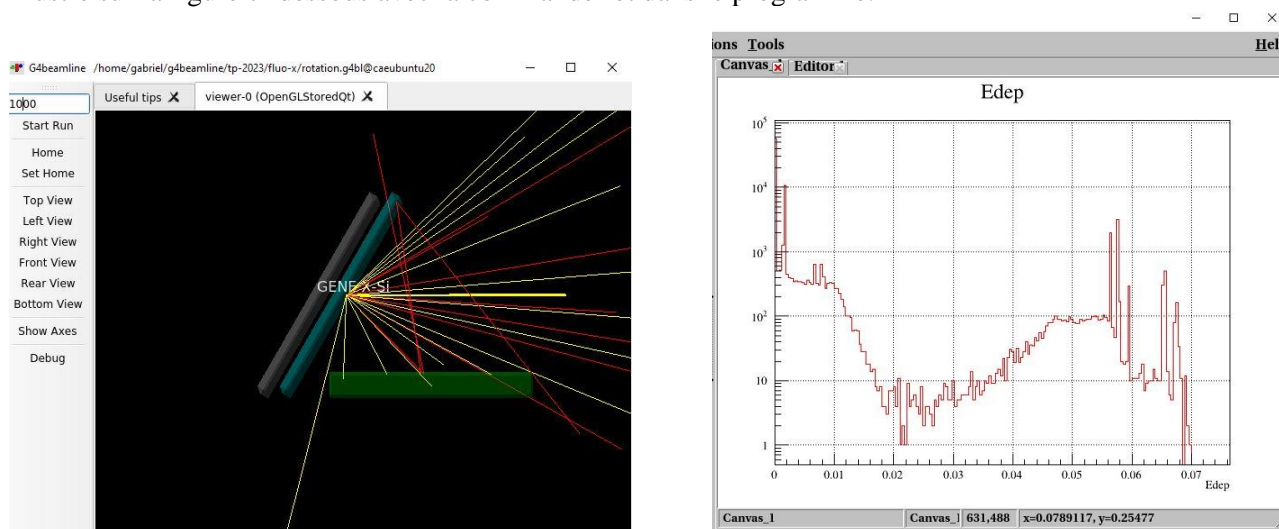
Créer un faisceau de photons d'énergie inférieure à 100keV. Dirigé ce faisceau sur une plaque de matériau constitué de plomb ou d'argent ou de cuivre,... Mettre en regard de ce matériau un détecteur en silicium afin de recueillir les photons émis par le matériau soumis au faisceau comme illustré sur la figure ci-dessous.

Observer les spectres obtenus sur le détecteur de silicium et identifier les pics caractéristiques.



Vue du dispositif expérimental avec faisceau de photons. Spectre de fluorescence observé sur le détecteur Si

On pourra par la suite modifier le dispositif et incliné les échantillons par rapport au faisceau comme illustré sur la figure ci-dessous avec la commande rot dans le programme.



Vue du dispositif expérimental avec faisceau de photons. Spectre de fluorescence observé sur le détecteur Si

## Simulation 8 : Mise en évidence du phénomène d'accumulation dit aussi de build-up.

Nous voudrions, à travers cette simulation observer le phénomène de build-up qui est constaté et pris en compte en radioprotection comme illustré sur le transparent ci-dessous provenant de l'IAEA (International Atomic Energy Agency).

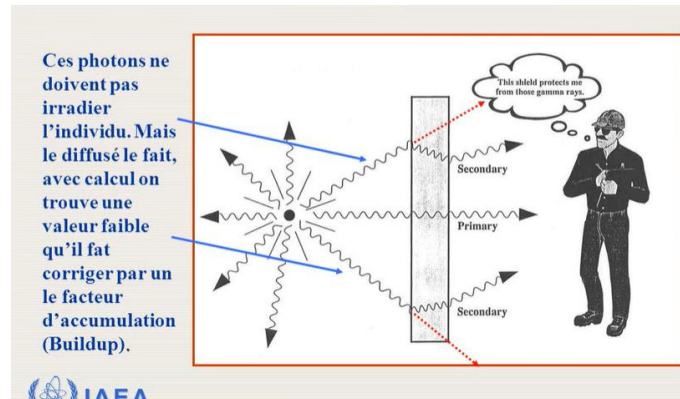
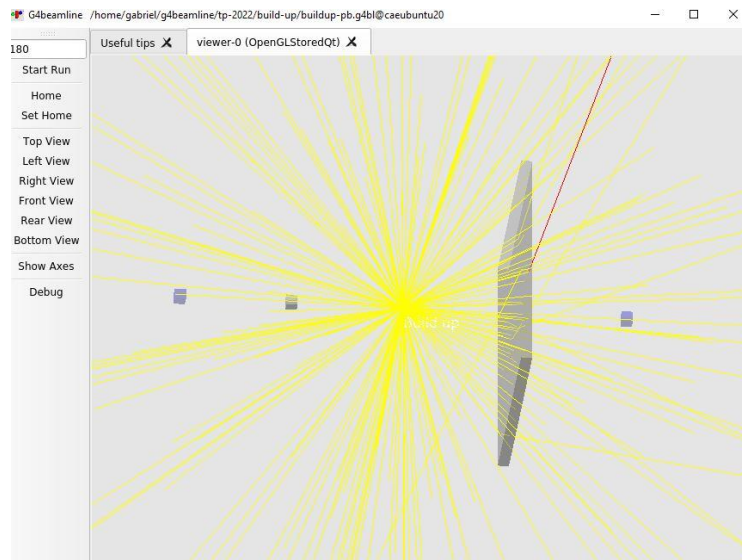
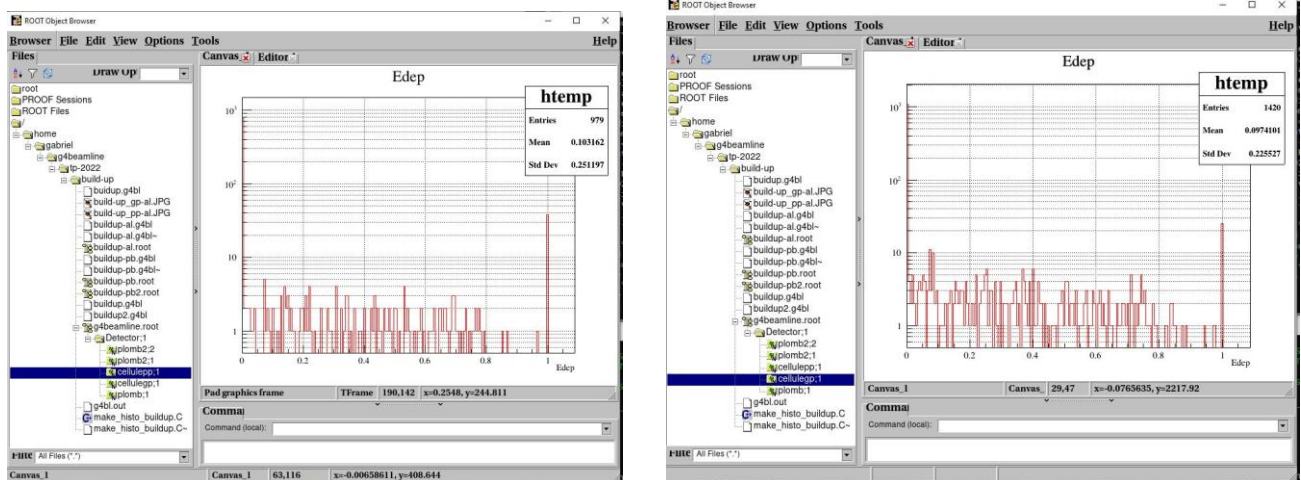


Illustration du phénomène de build-up (IAEA)

Générer une source de photons isotrope. Interposer entre cette source et un détecteur un écran de protection. Observer le spectre en énergie obtenu avec ce détecteur. Faites varier les dimensions de l'écran en maintenant l'épaisseur traversé constante. Observer si des modifications apparaissent sur le spectre. Commenter.



Vue d'ensemble du dispositif expérimental pour la mise en évidence du phénomène de build-up.



Spectre Edep obtenu dans le détecteur avec à gauche un petit écran et à droite avec un écran beaucoup plus grand mais tous deux de même épaisseur.

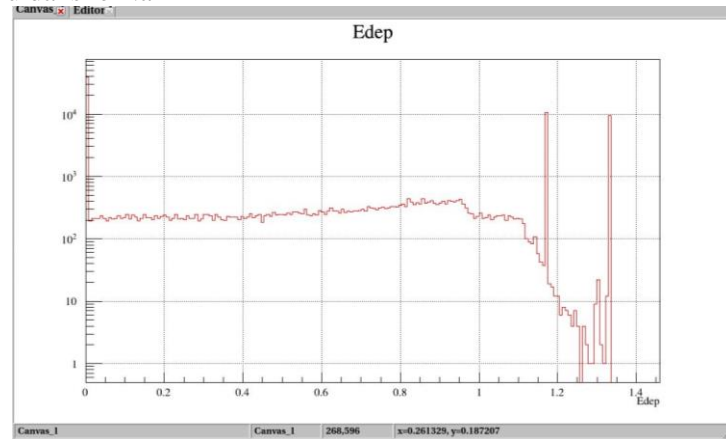
### Simu ++ Pour aller plus loin.

Nous proposons ci-après des idées pour améliorer la qualité et l'analyse des simulations.

#### Simulation 1 ++ Source émettant deux photons d'énergies différentes

Créer un fichier source lu par le programme .g4bl générant les deux photons émis par la source de cobalt60 (1,17 MeV et 1,33 MeV).

Pour se faire, il faut écrire un fichier co60.C qui pourra générer un fichier co60.root lu par le programme .g4bl. Vérifier le spectre obtenu dans le NaI

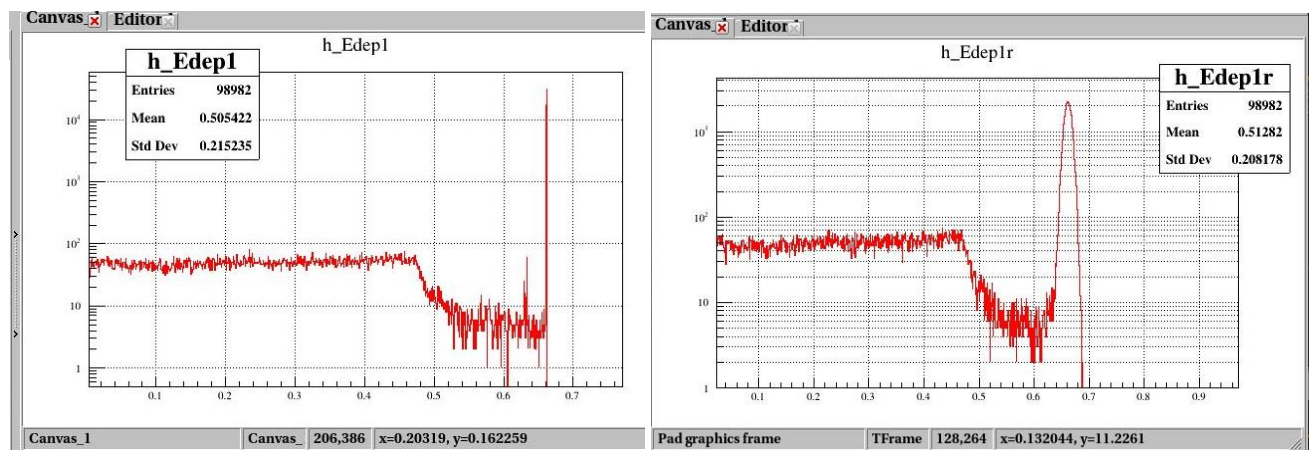


Spectre Edep observé dans le NaI avec une source de cobalt60.

#### Simulation 2 ++ Rajouter la résolution réelle d'un détecteur.

On voudrait rendre plus réaliste le spectre obtenu par simulation (simulation2) comparativement à celui obtenu expérimentalement en TP (semestre 1) avec une source de Césium 662 keV.

Écrire un programme d'analyse du fichier de sortie .root permettant de lire les données de ce fichier de sortie g4beamline.root de rajouter une fluctuation gaussienne sur la variable d'énergie et reconstruire le nouveau fichier de sortie.root. Visualiser à nouveau le spectre ainsi obtenu sur root et commenter.



Spectres Edep observé dans le NaI avec source Cs137. A gauche résolution parfaite. A droite avec résolution réelle du détecteur et de la chaîne expérimentale.

#### Simulation 3 ++

Apprendre à intégrer et faire un ajustement « fit » du spectre obtenu.

Récupérer les données brutes et les lire dans un fichier excel.

Additionner des spectres correspondant à l'énergie déposée par une même particule dans deux détecteurs différents.

Dévier une particule dans un champ magnétique ou électrique... Créer un cyclotron, ...